

塑性加工における金属-金型間のトライボロジー特性および

残留応力の逆磁歪効果による評価

三重大学大学院 工学研究科 機械工学専攻

小竹茂夫

(平成18年度一般研究開発助成 AF-2006015)

キーワード： 強磁性材料、 微小磁化測定、 交流消磁

1. 研究の目的と背景

1.1 塑性変形下での応力状態

一般に塑性加工においては、材料の特性や金型と試料の間のトライボロジー特性を微妙に変化させるだけで、出来上がる製品が大きく変化することが知られている。これは、(1)加工時に刻々と形状が変化してしまうこと、(2)加工硬化などにより機械的性質の変化が見られること、(3)型と試料との間の摩擦係数が、潤滑状態によって大きく変化すること、(4)応力によって誘起された相変態等の現象が絡むこと、等の理由により、塑性変形時の応力状態が大変複雑になっていることに起因する。

こうした加工時における応力は、試料そのものが金型やプレス等に覆われているため、その場で実際に評価することは難しく、多くの場合、境界条件や物性値を仮定したシミュレーション等の数値計算に頼らざるをえない。ところがわずかな誤差により、境界条件が大きく異なってきてしまうことから、計算結果にはあまり信頼性が得られないのが現状である。この他にも、流れ線場等の解析により変形後の各要素の塑性流動の様子が観察されているが、試料に切断面を入れる必要があり、また解析できる面も限られることから、実際の塑性変形における応力状態を明らかにするには十分な情報を得ることができない。

一方、加工後に残る残留応力は、製品の寿命や形状の経時変化とも大きく関わるため、これを正しく評価する必要がある。残留応力に関する従来の方法には、格子間隔をゲージとしたX線応力解析法や、切裂法による切断後の変形の評価が挙げられるが、前者はX線が試料の極表面にしか入らないことから、むしろ内部に存在する残留応力を評価することが難しい。また後者は全体の応力を評価することはできるものの破壊的な測定法であり、また細かな応力分布を評価する場合には使えない。

1.2 磁気特性の変化による応力の評価

近年、力学的な変形後の残留応力の簡便な評価法の一つとして、この応力付加によって現れる逆磁歪現象を利用する試みがなされている^{1,2)}。また残留応力が存在することにより、強磁性体の保磁力が変化することから、こうした磁気物性の変化を利用する試みもみられる³⁾。

強磁性体の磁化による歪の変化は、磁歪現象として知られるが、磁化された材料全体の磁区構造が特

定方向に異方性を持つことにより、磁区の磁化方向に対する歪量の差が全体に現れる。一方、その反対に歪による磁化の変化は、逆磁歪現象として知られるが、一般に磁歪現象ほど明確に現れず、その取り扱いが難しいのが現状である。これまでの研究でも磁気特性の変化により残留応力等の評価を行う研究がなされてきたが、僅かに生じる自発磁化と応力付加との関係を明らかにした研究はあまり見受けられない。

そこで研究では、わずかな磁化分布の変化を明らかにできるように磁気遮蔽された空間内での微細磁化分布を測定する装置を開発し、塑性変形後に生じる磁化分布から、内部に分布する塑性領域の不均一性から生じる残留応力の評価を試みた。

まず応力付加と磁気特性の関係を明らかにする目的で、単純な応力付加を与えた塑性変形において発生する磁化分布の測定を試みた。特に機械加工の中でも特に単純なモデルである一軸引張加工を行い、加工前後の3次元磁束密度分布の変化を測定することで応力状態が逆磁歪効果によって生じる材料の残留磁化に及ぼす影響について考察した。

次に本研究では、単純な塑性変形である圧子の押し込みや一様据え込み加工を行い、塑性変形後の試料に残る残留磁化から加工によって生じる残留応力を評価することにより、塑性加工時の形状や金型との間に生じるトライボロジー特性によって変化する応力状態の評価を試みた。

さらに本研究では、塑性変形後の試料について外部の磁化印加後、自作した多段階回転交流消磁によって変化する保磁力の分布を測定することにより、自発的磁化と対比させながら、それらの違いについて議論をおこなった。

2. 測定原理

強磁性体中の応力と磁化との間には次式に示す磁気弾性エネルギー E と磁場エネルギーが存在することから、応力付加時には、これらのエネルギーの和が最小になるよう磁化が生じる。

$$E = -\frac{3}{2}\lambda\sigma\cos^2\theta + \frac{1}{2\mu}B^2 \quad (1)$$

ここで λ は磁歪定数、 σ は応力ベクトルの絶対値、 θ は応力ベクトル σ と磁束ベクトルとのなす角、 μ は媒質の透磁率である。 E を最小にすることにより磁束分布が決定されることから、誘起された磁界を測定することで応力分布を推定することができる。

Ni や Co においては一般に $\lambda < 0$ であることから、均一磁場においては応力ベクトルと磁束ベクトルは垂直方向に向く傾向があるものと考えられる。また Fe は結晶軸の方位によって λ が正から負へと変化するために、一般には応力と磁化の関係は明確には現れない。

3. 測定試料及び実験方法

3-1 測定試料および加工方法

3-1-1 引張加工

引張加工の試料には純 Ni (99.9% up) を用い、残留応力等による初期残留磁化の影響をなくするため、真空炉による焼鈍 (約 400°C) と回転交流消磁を行った。その後、外部磁場による試料の磁化を防ぐため、パーマロイ管内にて Ni 薄板の引張加工を行い、塑性変形させ、試験前と試験後の残留磁束密度分布を比較した。図 1 に各試験における試料の寸法、測定面を示す。

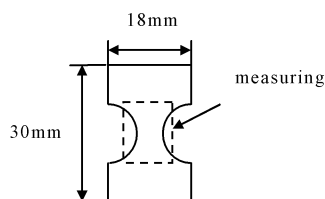


図 1 引張試験における試験片の形状

3-1-2 圧子の押し込みおよび据え込み加工

圧子の押し込みおよび据え込み加工の試料には純 Ni (99.9% up) と SUS304 を用いた。試料に残る初期磁化の影響をなくするための消磁を行った後、圧子押し込み (荷重 496N) や据え込み加工 (最大圧力 1.4×10^{12} Pa) により試料を塑性変形させ、試験前と試験後の残留磁束密度分布を比較した。図 2 に各試験における試料の寸法、測定面を示す。

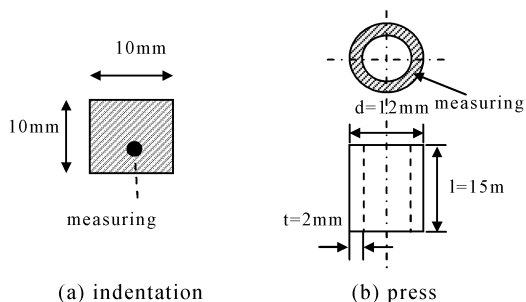


図 2 圧子押し込みおよび据え込み加工における試験片形状

据え込み加工には油圧式手動プレス機を用いた。周囲の温度は常温であり、プレス工具面との磁性の影響を減らすために工具と試料の間には非磁性である超硬材料を置いた。加工時のプレス圧力は 250 kg/cm^2 であり、潤滑油は使用していない。

3-2 漏れ磁束密度測定

漏れ磁束密度測定装置の概略図を図 3 に示す。装置は測定センサに MI 素子 (愛知製鋼社製) を用い、

X-Y-Z ステージ (シグマ光機製) により試料表面に磁気センサを走査させることにより、試料表面から漏れる磁束密度ベクトルの 3 次元測定を行う。試料はパーマロイ管で防磁された空間内部の非磁性台上に固定されており、外部磁化の影響は $\mu \text{ T}$ 以下に除かれている。

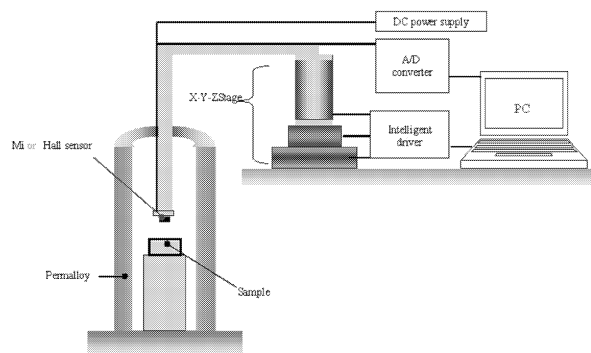


図 3 3次元漏れ磁束密度分布測定装置の概略図

3-3 多段階回転交流消磁

変形直後の試料について、空芯ソレノイドコイル内部で試料を回転させながら、10Hz、300s で均一磁界を減衰させることにより交流消磁をおこない (図 4)、消磁後の試料について再び微小磁化測定を行った。この際、交流消磁の際の最大磁場を次第に高くすることにより、多段階での交流消磁をおこなった。

消磁の際にも、ソレノイドコイルの周囲をパーマロイ管で覆い磁気遮蔽を施した。試料を有芯電磁石により、0.2T 下で試料長手方向に着磁させ、同様に多段階交流消磁を施し、各磁界で消磁されたのちの試料の漏れ磁束密度分布を測定した。

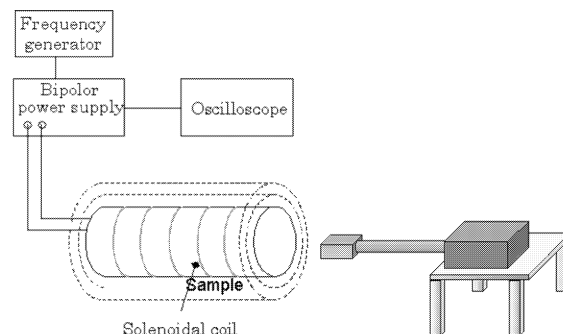


図 4 多段階回転交流消磁装置の概略図

4. 引張加工後の結果と考察^{6,7)}

4.1 引張加工直後の自発磁化

図 5(a) に熱消磁後の、(b) に引張加工直後の試料表面からの漏れ磁束密度分布を示す。熱消磁後には、磁束密度ベクトルはランダムな方向を向いており、 $1 \mu \text{ T}$ 以下で完全に消磁されていることが分かる。

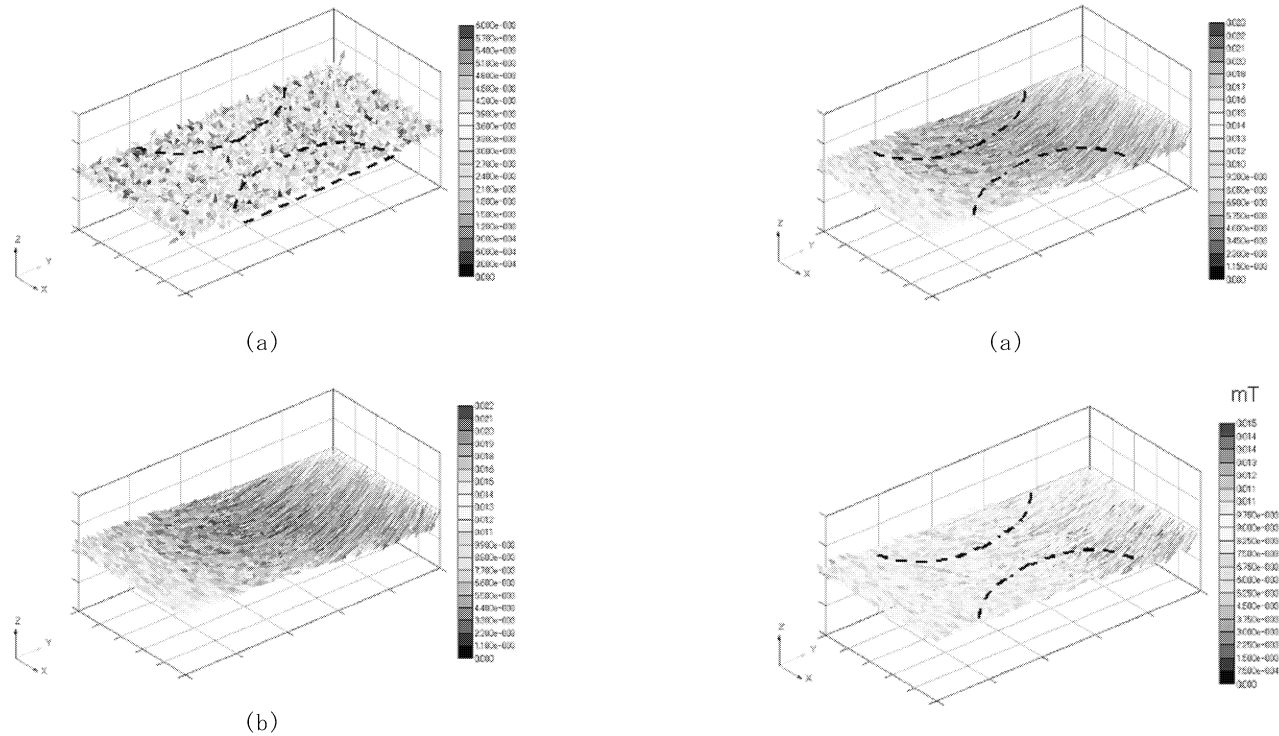


図 5 漏れ磁束分布図 (a) 熱消磁後 (b) 引張加工後 [mT]

一方、塑性変形後の試料は、引張方向に磁束ベクトルが揃っており、大きさも $20 \mu\text{T}$ 以上と増大していたことから、応力による自発磁化が発現していた。Ni は結晶方向に依らずに磁歪係数が負であることから⁴⁾、磁束ベクトルは圧縮方向に向くことが知られている。よって今回の引張軸方向への磁束の発現は、試料全体に広がる引張方向の塑性変形領域によって残留した弾性圧縮応力によるスプリングバックであると推察された。

4.2 塑性変形後の試料の段階交流消磁

次に自発磁化した磁気分布について段階交流磁気消磁をおこなった。図 6(a)～(c)に各最大磁場での消磁後の漏れ磁束密度分布を示す。530A/m では全く消磁される心配がなかった磁化分布が、700A/m 以下の磁気消磁では、くびれ部にのみ残留磁化が観察された。この局所的な残留磁化分布については、後からの考察で詳しく述べる。

4.3 着磁後の試料の段階交流消磁

一方、塑性変形後の同じ試料について、電磁石により着磁させた後に段階交流消磁を施した。図 7 に各最大磁場 1770A/m での消磁後の漏れ磁束密度分布を示す。これらの磁化分布は、図 6 での結果とほぼ等しく、着磁か自発磁化かに関わらず、高い保磁力を示した領域が等しいことが分かった。

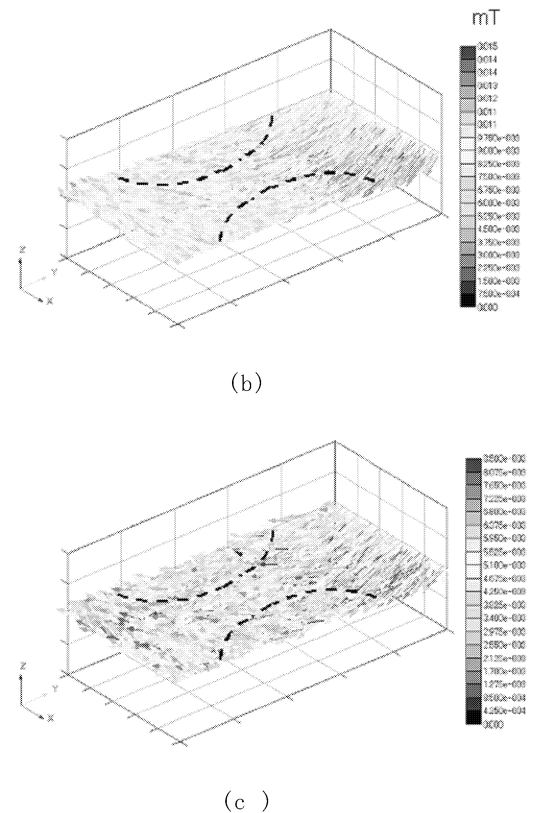


図 6 回転交流消磁後の漏れ磁束分布図 (a) 530A/m, (b) 710A/m, (c) 890A/m [mT]

4.4 保磁力の意味

一般に保磁力を左右する要因に合金濃度や微細粒子の析出等の働きが存在するが、これらは結晶構造も含め広い意味で材料内部の応力による磁気スピンへの影響である。一般に外部やマクロな不均一性から生じる力学的な応力は、ミクロなこれらの応力に比して小さいため、これらの影響を無視することはできない。一方、今回の試料は焼鈍させた純 Ni 板であったことから、こうした材料固有のミクロな保磁力が小さな軟磁性であり、マクロな外部応力は保磁力の大きな要因となりうる可能性がある。結晶磁気異方性や形状磁気異方性も同様に保磁力に影響を与えるものと考えられるが、ランダムな多結晶表面のコントラストは、これらには影響を及ぼさないものと考えられる。

一般に保磁力と残留応力の関係は、エネルギー論から、以下のような式が成り立つ³⁾。

$$\sigma = h_c J_s / 3\lambda_s \quad (2)$$

ここで h_c は保磁力、 $J_s (=0.617\text{T})$ は飽和磁化、 $\lambda_s (= -34 \times 10^{-6})$ は磁歪係数である。残留応力は、塑性加工等で論じられるマクロな残留応力と、原子オーダーで磁気スピンの関与するミクロな残留応力であり、後者は、前者の下駄となって現れる。

今回、ミクロな残留応力による保磁力は十分に小さいものとして残留応力を見積もったところ、図 6(a) は残留応力が 3.2MPa 以上の、図 6(b) は残留応力が 4.3MPa 以上の、図 6(c) は残留応力が 5.4MPa 以上の領域であると推察された。

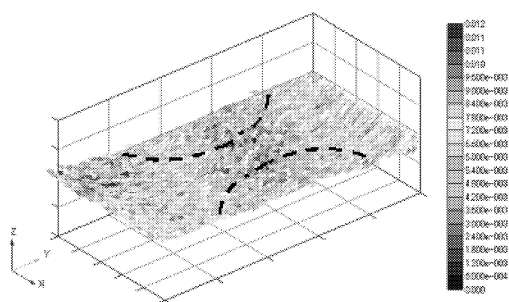


図 7 回転交流消磁後の漏れ磁束分布図
1770A/m[mT]

4.5 自発磁化の意味

静的な応力や歪は作用する面に対して対称であるのに対して、磁化は N から S へと方向を持つ非対称な物理量であることが挙げられる。そのため、磁化させた方向に決まって歪むことはできても、歪ませた方向に磁化するベクトルには、正反対な 2 方向が存在するため、NS が決まらない。そのため、強磁性体に歪みを与えても、正反対の磁化が同じだけ現れてくるため、外部で大きな磁化が漏れ出てくることは期待できない。しかし今回、大きな自発磁化が発現したことから、実際には自発的対称性の破れが存在した。

5. 圧子押し込みおよび据え込み加工後の結果と考察⁸⁾

5.1 圧子押し込みによる残留磁束密度変化

図 8 に熱消磁後の磁束密度分布を示す。測定センサには MI 素子を用いた。一方、図 9 に圧子押し込み後の Ni 試料の表面漏れ磁束分布を示す。中心に 0.7mm 程度の窪みがあり、磁束密度の最大値は 0.077mT であった。磁束は窪みの周りに渦を巻くように分布した。

押し込み試験にて荷重 500N を掛けた場合における純 Ni の応力分布について、有限要素法 (ANSYS) を用いて解析を行ったところ、変形における相当応力

の分布は圧子先端部分において最大であった。このように圧子押し込みの際、圧子と材料表面との接触部分において接触域直下で降伏が生じ、塑性流動域が形成され、面内に引張り応力が発生する。次に次第に荷重を与えていくことで圧子が材料に侵入し、圧子鉛直方向への押し込みにより窪みが成長していく過程において、さらなる塑性流動域が形成される。

磁束が表面を渦を巻くように分布したことは、この塑性流動部に対応するものと考えられる。ここで Ni の磁歪係数は負であることから、塑性加工面に平行に磁束ベクトルが向くためには、面に垂直に引っ張り応力が掛かるか、面のせん断方向に引っ張り応力が掛かるかしなければならない。前者の場合、圧縮変形後のスプリングバックを意味し、後者の場合、試料-金型間のせん断力を表すが、両者の区別は今のところできていない。

一方、図 8 に示した純 Ni における磁束の B_z 成分の分布と比較すると、 B_z 成分は凹部の中心に向かうほど減少していた。これは圧痕の中央部ほど塑性変形が強く、円筒状の特殊形状から、スプリングバックが少なかったためとも考えられるが、単純に尖った形状において磁化エネルギーが小さくなるように分布したためとも説明される。

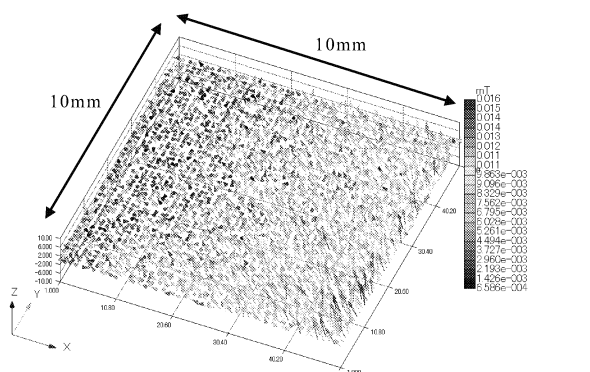


図 8 Ni 板における熱消磁後の漏れ磁束分布図

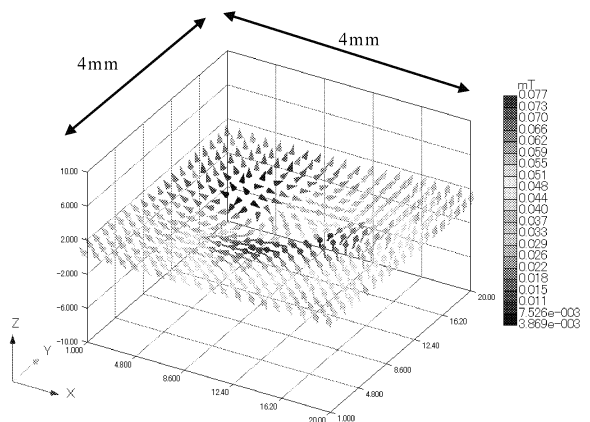


図 9 圧子を押し込んだ後の Ni 板における漏れ磁束分布図

5.2 据え込み加工による磁束密度変化

据え込み加工に際しては、プレス工具からの磁場の影響を防ぐため、試料との間に非磁性材料 (黄銅) を設置した。また消磁器による消磁では試料作成時の切削加工により生じる試料内部のマルテンサイト

を除去することはできないため、真空炉を用いて試料をオーステナイト化温度まで加熱し、マルテンサイトをオーステナイト化した後、加工を行った。図 10、図 11 に加工前と加工後の磁束密度分布を示す。加工後の試料の高さは 5mm まで縮んだ。試料作成時のマルテンサイトは除去されているにもかかわらず据え込み加工前後で磁性の変化が現れたことから、据え込み加工により応力誘起マルテンサイトが現れ、これが逆磁歪効果により自発磁化を発現したものと考えられる。特に間に置いた黄銅板の塑性変形が大きい場合に大きな残留磁化が観察されたことから、黄銅板と試料との間のすべりによって磁化が発現したものと考えられた。

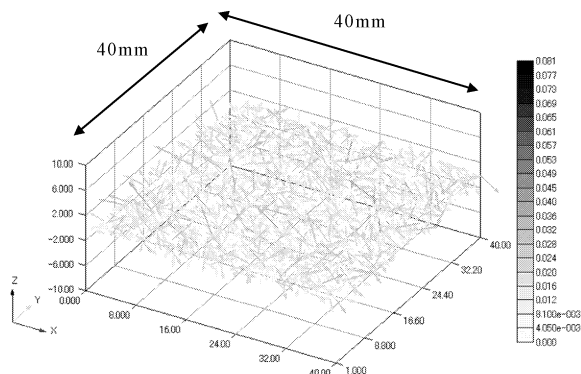


図 10 SUS304 パイプ断面における熱消磁後の漏れ磁束分布図

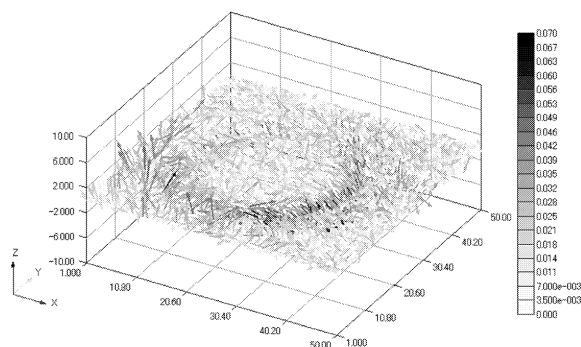


図 11 据え込み加工後の SUS304 パイプ断面における漏れ磁束分布図

6. 結論

引張加工後に発生する自発磁化を評価することにより、軟磁性体である Ni について、塑性変形後のスプリングバックによる局所的な残留応力を推定することができた。また多段階交流消磁法を利用することにより、塑性加工前後の保磁力を評価することにより、同様な変化が観察された。

また圧子の押し込みや据え込み加工によって発生する自発磁化を評価することにより、塑性変形における残留応力や加工時に試料と金型間で生じたトライボロジー特性の変化を示唆する磁気分布が得られた。しかしながら単純な引張応力とは違い、金型との接触で進む塑性加工における磁化分布は複雑であり、さらなる研究が望まれる。

謝辞

今回の報告書をまとめるにあたり、資金的援助をいただいた財団法人天田金属加工機械技術振興財団に感謝いたします。また共同に研究を行った三重大学大学院工学研究科の鈴木泰之教授、桑鶴貞雄氏、東浄沢間氏、三重大学工学部の塚原修一氏に感謝いたします。

参考文献

- 1) V. Maurel, F. Ossart and R. Billardon, J. Appl. Phys., 93 (2003) 7106.
- 2) 小竹茂夫他, 漏れ磁束密度ベクトル測定による一方向破壊させたフェライト破面の評価, 日本材料学会 56 期学術講演会 (2007).
- 3) 小玉一人, 古地磁気学, 東京大学出版会 (1999).
- 4) E.T. Lacheisserie, Magnetostriction, CRC Press, Boca Raton (1993).
- 5) 東浄沢間, 小竹茂夫, 鈴木泰之, 3次元漏れ磁束密度ベクトルによる強磁性材料中の残留応力の評価, 日本機械学会 2007 年度年次大会, 2234 (2007).
- 6) 桑鶴貞雄, 小竹茂夫, 鈴木泰之, 回転交流消磁後の残留磁化による塑性変形後の残留応力分布測定, 日本機械学会東海支部 2008 年度総会講演会 (2008).
- 7) 塚原修一, 東浄沢間, 小竹茂夫, 鈴木泰之 3次元磁束ベクトル測定による一様据え込み加工の評価, 日本機械学会東海支部 2007 年度総会講演会 (2007).
- 8) 小竹茂夫, 桑鶴貞雄, 鈴木泰之, 強磁性金属の塑性変形による自発磁化, 日本塑性加工学会 2009 年度総会講演会 (2009).